DOI: 10.22067/jfcei.2022.74215.1102
https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

یک مدل ساده‌شده برای سیستم دوگانهٔ قاب خمشی- دیوار برشی*

مقاله پژوهشی

پریسا اسماعیل تبار نشلی(١)   حر خسروی(٢)   جواد واثقی امیری(٣)

چکیده *در آنالیزهای حجیم دینامیکی هزینهٔ محاسباتی و زمان تحلیل بالا است، لذا نیاز به مدل‌های ساده‌شده‌ای می‌باشد که در مقایسه با مدل دارای جزئیات با دقت مناسب و قابل قبول، زمان فرآیند تحلیل را به‌میزان قابل توجهی کاهش دهد. در این تحقیق مدل ساده‌شده چند درجه آزادی برای سیستم دوگانهٔ قاب خمشی- دیوار برشی با پلان منظم پیشنهاد شده‌است. برای دیوار برشی از مدل MVLEM و برای قاب خمشی از مدل قاب جایگزین بهره گرفته شده‌است. مدل MVLEM از المان‌های محوری تشکیل شده‌است که رفتار خمشی دیوار برشی را به‌خوبی مدل‌سازی می‌کنند و مدل قاب جایگزین نیز مدل قاب یک‌دهانه‌ای است که جایگزین قاب‌های خمشی بتنی چنددهانه مدل می‌شود. در انتها دقت و سرعت مدل ساده‌شده نسبت‌به مدل اصلی دارای جزئیات بررسی گردید. نتایج آنالیزها نشان می‌دهد که مدل ساده‌شده پاسخ‌های لرزه‌ای را با خطای کمتر از ٢٠ درصد و با زمان آنالیز کمتر از ٣٠ برابر نسبت‌به مدل دارای جزئیات ارائه می‌دهند.*

واژه‌های کلیدی مدل‌های ساده‌شده، سیستم دوگانه قاب خمشی- دیوار برشی، مدل MVLEM، مدل قاب جایگزین، تحلیل دینامیکی غیرخطی.

مقدمه

استفاده از روش مدل‌سازی فایبر جهت مدل‌سازی غیرخطی دیوار برشی بتن‌آرمه بسیار متداول می‌باشد. در این روش بااستفاده از المان‌های فایبر که براساس روابط تنش- کرنش مصالح می‌باشند، در کل طول المان رفتار پلاستیسیته گسترده در نظر گرفته می‌شود [1-3]. از سال ١٩٨٣ به بعد با ارائهٔ مدل سه‌المان محوری قائم (Three Vertical Line Element Model) که توسط کابیاساوا و همکاران [4] پیشنهاد شده‌است، مدل‌هایی که مبتنی‌بر المان‌های محوری قائم می‌باشند ارائه شدند که هم‌چنان در حال توسعه می‌باشند. این مدل در سال‌های ١٩٨٧ و ١٩٨٨ توسط ولکانو و همکاران[5] اصلاح گردید و تحت عنوان مدل چندالمان محوری قائم (Multi Vertical Line Element Model) نام‌گذاری شد که رفتارهای خمشی دیوار را به‌خوبی مدل‌سازی می‌کنند [6]. ماسون و والاس[7] این مدل را برای درنظر گرفتن اندرکنش برش و نیروی محوری اصلاح کردند. اراکال و والاس[8] مدل MVLEM را به‌طور مستقیم براساس روابط ساختاری مصالح تحت بارگذاری سیکلیک ارائه کردند. کلوزواری و والاس[9-12] مدل MVLEM را که اندرکنش خمش و برش را درنظر می‌گیرد و به‌طور مستقیم برمبنای رفتار ساختاری مصالح می‌باشد پیشنهاد کردند و در برنامهٔ OpenSees نیز پیاده‌سازی نمودند. در سال ٢٠١٩ اسماعیل تبار و همکاران[١٤] بااستفاده از مدل MVLEM در برنامهٔ OpenSees مقایسه‌ای را میان مدل‌های تحلیلی و مدل‌های رفتاری مختلف مصالح به‌منظور بررسی رفتار غیرخطی دیوار برشی ارائه کرده‌اند [13].

از میان مدل‌های ساده‌شده‌ای که برای قاب خمشی ارائه شده‌است می‌توان به مدل استخوان ماهی که اولین‌بار توسط ناکاشیما و همکاران[15] پیشنهاد شده‌است اشاره کرد. مدل استخوان ماهی شامل یک ستون می‌باشد که معادل تمامی ستون-های یک طبقه است و تمامی تیرهای یک طبقه به دو نیم‌تیر که از دو طرف ستون معادل گسترش یافته‌اند و در انتها برروی تکیه‌گاه غلتکی قرار می‌گیرند، تبدیل می‌شوند. این مدل توسط خسروی و خالو[16,17] برای قاب‌های فولادی اصلاح گردید و توسط سلیمانی و خسروی برای قاب‌های بتنی توسعه داده شده‌است که یکی از مدل‌های ارائه‌شده برای قاب بتنی مدل قاب جایگزین می‌باشد. در سال‌های اخیر محققان زیادی از خانوادهٔ مدل‌های استخوان ماهی به‌عنوان مدل ساده‌شدهٔ قاب خمشی،

* تاریخ دریافت مقاله ١٤٠٠/٩/٢٥ و تاریخ پذیرش آن ١٤٠٠/١٢/٨می‌باشد.

(١) دانش آموختهٔ دکتری دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوسیروانی بابل.
(٢) نویسندهٔ مسئول، استادیار دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.
(٣) استاد دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.
Email: khosravi@nit.ac.ir

به‌خصوص در آنالیزهای حجیم بهره گرفته‌اند [27-18].

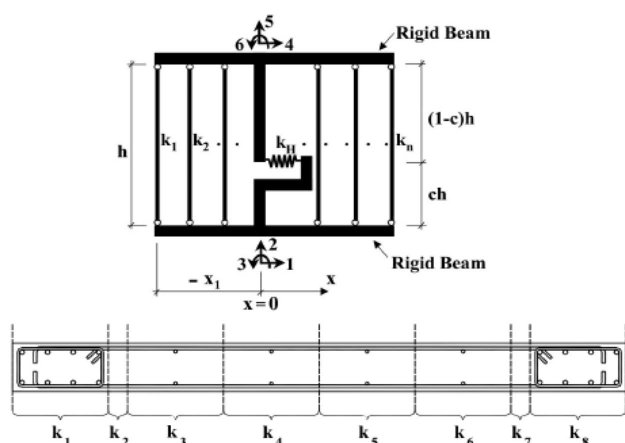
به‌منظور بررسی رفتار غیرخطی سیستم‌های دوگانه مطالعاتی صورت گرفته‌است که از آن جمله می‌توان به مدل تیر پیوسته اشاره کرد که اولین‌بار توسط خان و اابارونیز به‌منظور بررسی اندرکنش قاب خمشی و دیوار برشی ارائه شد [28]. در این روش سازه با دیوار برشی با سختی یک‌نواخت، می‌تواند به‌عنوان یک سیستم پیوستهٔ معادل که شامل ترکیبی از طرهٔ خمشی و طرهٔ برشی می‌باشد مدل‌سازی شود. هم‌چنین در تحقیقی که توسط هوآنگ و کوآنگ[29] صورت گرفته‌است از این تکنیک پیوسته برای تخمین پاسخ لرزه‌ای سازه‌های با دیوار برشی با سختی یک‌نواخت در ساختمان‌های بلند استفاده شده‌است. مدل‌های ساده‌شدهٔ دیگری نیز برای سیستم دوگانهٔ قاب خمشی- دیوار برشی ارائه شده‌است که از مدل‌های ساده‌شده MVLEM برای مدل‌سازی دیوار برشی استفاده شده‌است [34-30]. در اکثر این مدل‌ها اندرکنش بین قاب و دیوار با المان صلب لحاظ شده‌است.

باتوجه به تحقیقاتی که تاکنون انجام شده‌است و باتوجه به اهمیت بررسی رفتار سیستم دوگانهٔ قاب-دیوار برشی، نیاز به مدل ساده‌شده‌ای می‌باشد که بتوان رفتار لرزه‌ای سیستم را با صرف زمان کمتر و با حداکثر دقت آنالیز و بررسی کرد؛ لذا در این تحقیق باتوجه به مدل‌های ساده‌شده‌ای که برای هر یک از سیستم‌های قاب خمشی و دیوار برشی به‌طور جداگانه ارائه شده‌است مدل ساده‌شده‌ای برای سیستم دوگانه پیشنهاد شده‌است.

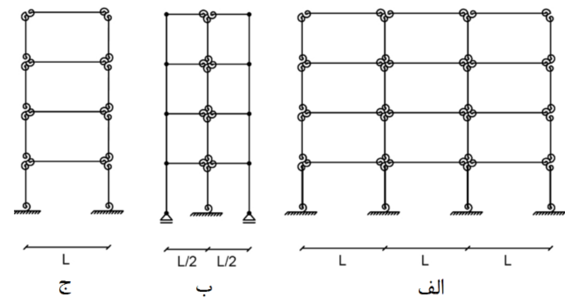
پیشنهاد یک مدل ساده‌شده

به‌طور معمول از مدل فایبر برای مدل‌سازی با جزئیات دیوار برشی استفاده می‌شود. از میان مدل‌های ساده‌شده‌ای که برای دیوار برشی ارائه شده‌است مدل چندالمان محوری خطی تحت عنوان مدل MVLEM به‌عنوان مدل ساده‌شدهٔ کارا برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی دیوار برشی بتن‌آرمه استفاده می‌شود. این مدل برپایهٔ مدل ارائه‌شده توسط ولکانو و همکاران می‌باشد [6]. در این مدل، مطابق شکل (۱) دیوار با المان‌های تک‌محوری با سختی k_1 تا k_n به‌صورت موازی، یک المان صلب محوری در مرکز دیوار و تیرهای با صلبیت بی‌نهایت در بالا و پایین‌تر از طبقه مدل می‌شود. مشخصات سختی و رابطهٔ نیرو- تغییرمکان المان‌های محوری به روابط ساختاری تنش- کرنش بتن و فولاد و سطح نسبت داده‌شده به هر المان بستگی دارد. چرخش نسبی المان دیوار حول نقطه‌ای به ارتفاع ch روی محور مرکزی دیوار اتفاق می‌افتد که بیانگر تغییر جایگاه تار خنثی در مقطع دیوار می‌باشد. انتخاب پارامتر c بستگی به توزیع خمش در ارتفاع دیوار دارد که برای انحنای ساده بین صفر و یک متغیر است. تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که مقدار c=0.4 می‌تواند بهترین نقطه برای مرکز دوران باشد [7]. پاسخ غیرخطی برشی دیوار توسط فنر افقی با سختی k_H درنظر گرفته می‌شود که در ارتفاع ch قرار داده می‌شود. باتوجه به این‌که در این تحقیق تمرکز برروی پاسخ‌های خمشی سیستم دوگانه می‌باشد برای فنر برشی یک سختی الاستیک با مقدار زیاد درنظر گرفته شده‌است.

برای مدل ساده‌شدهٔ قاب خمشی، از مدل قاب جایگزین پیشنهادشده توسط سلیمانی و همکاران مطابق شکل (۲) استفاده شده‌است [17]. در این مدل باتوجه به این‌که چرخش گره‌های یک طبقه تقریباً یکسان است می‌توان سختی تیرها و ستون‌ها را به‌صورت سختی‌های موازی درنظر گرفت و قابل جمع شدن می‌باشند و بنابراین می‌توان قاب چنددهانه را با قاب یک‌دهانه جایگزین کرد. به‌طور خلاصه مدل قاب جایگزین سختی و مقاومت المان‌های یک قاب n دهانه را به یک قاب یک‌دهانه متمرکز می‌کند. رفتار و تغییرشکل‌های تیر اصلی و حتی انحنای سادهٔ تیر می‌تواند بااستفاده از یک تیر با طول کامل که اجازهٔ حرکت خط تأثیر را می‌دهد شبیه‌سازی شود. علاوه‌بر این تغییرشکل‌های خمشی قاب اصلی می‌تواند با کشیدگی و انقباض ستون‌های قاب جایگزین به‌دست آید.



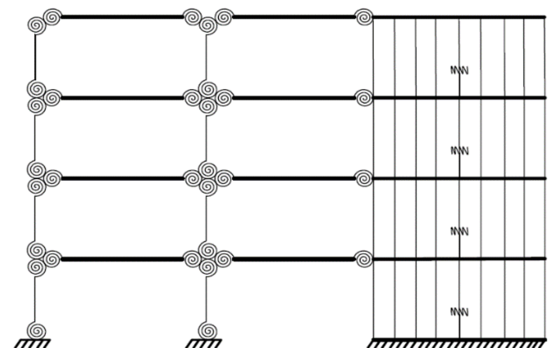
شکل ۱ مدل MVLEM برای دیوار برشی [8]



شکل ۲ مدل‌های قاب: (الف) CMRF، (ب) MFB و (ج)SF [20]

در قاب خمشی بتنی برخلاف قاب خمشی فولادی، ظرفیت لنگر مثبت و منفی تیرها با هم برابر نیست که این موضوع سبب تقدم و تأخر مفصل شدن دو انتهای تیر می‌شود. به این معنی که وقتی قاب خمشی بتن‌آرمه تحت بارگذاری جانبی قرار می‌گیرد، یک انتهای تیر که ظرفیت کمتری دارد زودتر تسلیم می‌شود و بنابراین نقطهٔ عطف در وسط تیر قرار نمی‌گیرد. این مشکل در مدل یک‌دهانهٔ قاب جایگزین برطرف شده‌است. تمام پارامترهای این مدل مانند مدل MFB است ولی چون مدل دارای دو ستون است، EI و M_y ستون‌ها در این مدل برابر نصف مقادیر متناظر در تک ستون مدل MFB می‌باشد. هم‌چنین مساحت ستون‌ها باید برابر مساحت المان‌های خرپایی دو طرف مدل MFB لحاظ شود.

در این تحقیق مدلی برای سیستم دوگانهٔ منظم در پلان و دارای دهانه‌های یکسان پیشنهاد شده‌است که ترکیبی از مدل‌های سادهٔ شدهٔ دیوار برشی و قاب خمشی می‌باشد (شکل ۳). برای دیوار برشی از مدل ساده‌شدهٔ MVLEM و برای قاب خمشی از مدل ساده‌شدهٔ قاب جایگزین استفاده شده‌است که توسط تیرهای رابطی به یکدیگر متصل شده‌اند. این تیرهای رابط نمایندهٔ تیرهای بین قاب و دیوار در مدل اصلی می‌باشند.

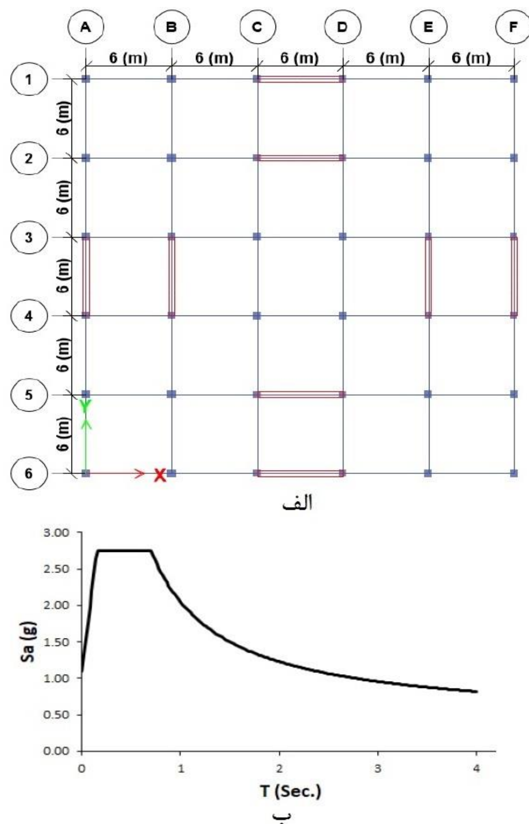


شکل ۳ مدل ساده‌شدهٔ پیشنهادشده برای سیستم دوگانهٔ قاب خمشی و دیوار برشی

مدل ساختمانی

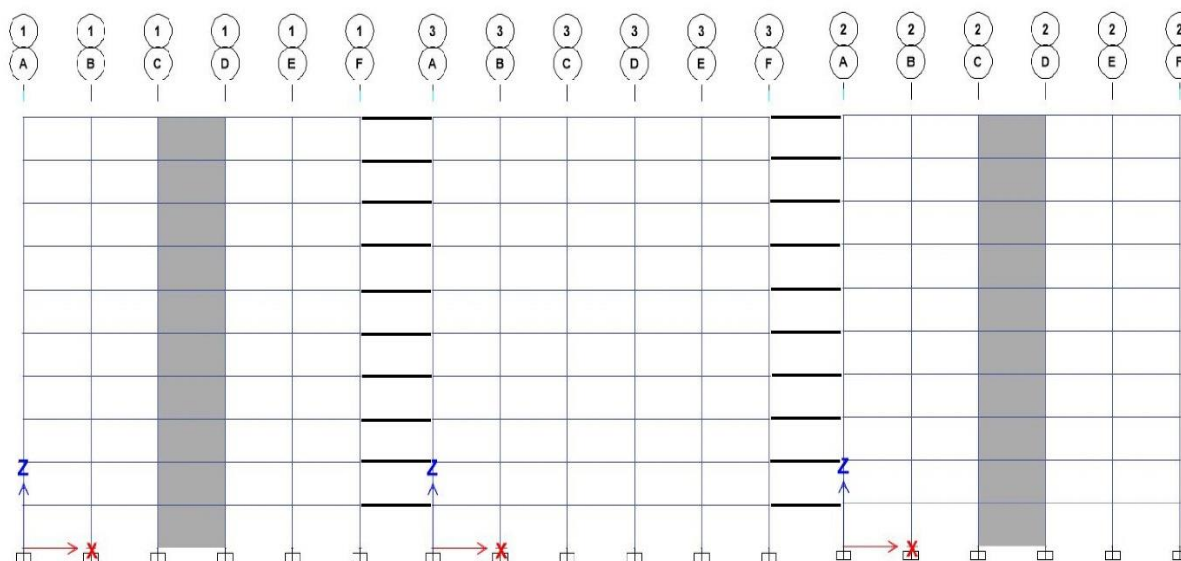
به‌منظور ارزیابی سیستم ساده‌شدهٔ پیشنهادی قاب خمشی- دیوار برشی بتنی، یک ساختمان ده‌طبقه طراحی شده‌است (شکل ٤- الف). این مدل به‌عنوان مدل اصلی یا مدل مرجع است و مدل ساده‌شدهٔ پیشنهادی با آن مقایسه می‌گردد.

ساختمان در دو جهت متقارن است و دارای پنج دهانهٔ ٦ متری و با ارتفاع طبقات۳/۲ متر می‌باشد. بار مرده و زندهٔ کف طبقات به‌ترتیب ۵ و ۲ کیلونیوتن بر متر مربع دنظر گرفته شده‌است. برای تعیین بار طراحی لرزه‌ای براساس آیین‌نامهٔ ASCE/SEI 7-10، طیف پاسخ طراحی برای خاک نوع D واقع در منطقهٔ کالیفرنیا با ($S_1 = 0.S_s = 1.25$,) تعیین شده‌است. طیف طراحی سازه در شکل (٤- ب) نشان داده شده‌است.



شکل ٤ ساختمان ده‌طبقهٔ مورد بررسی: (الف) پلان سازه، (ب) طیف طراحی سازه

باتوجه به تقارن سازه در دو جهت، مدل با جزییات مطابق شکل (۵) انتخاب شده‌است؛ یعنی قاب‌های شمارهٔ ۱، ۲ و ۳ درنظر گرفته شده‌اند که به‌صورت طبقهٔ صلب به‌هم وصل شده‌اند.



شکل ۵ مدل دارای جزئیات سیستم دوگانهٔ قاب- دیوار

جدول ۱ مشخصات مقاطع تیرها و ستون قاب‌های ۲،۱ و۳

شمارهٔ قاب	طبقهٔ اول- سوم	طبقهٔ چهارم- ششم	طبقهٔ هفتم و هشتم	طبقهٔ نهم و دهم
ستون‌های قاب ۱و ۲	C55-16T18	C50-16T16	C45-16T16	C40-16T16
ستون‌های قاب ۳	C50-16T16 C55-16T18	C45-16T16 C50-16T16	C40-16T16 C45-16T16	C35-16T12 C40-16T16
ابعاد تیرها	B55*55	B50*50	B45*45	B40*40

جدول ۲ مشخصات مقاطع دیوارهای قاب‌های ۲،۱

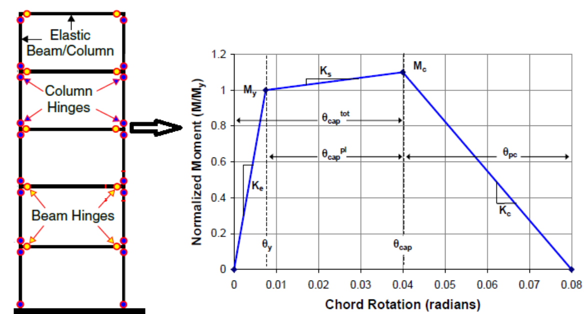
مشخصات دیوار	طبقهٔ اول و دوم	طبقهٔ سوم و چهارم	طبقهٔ پنجم و ششم	طبقهٔ هفتم و هشتم
ضخامت دیوار و میلگرد طولی	40 cm T10@300	35 cm T10@300	30 cm T10@300	25 cm T10@300
ابعاد و میلگرد المان مرزی	C65*65-24T28	C60*60-24T25	C55*55-24T20	C50*50-20T18

در جدول (۱) مشخصات تیرها و ستون‌ها ارائه شده‌است. تمام تیرهای یک طبقهٔ تیپ درنظر گرفته شده‌اند. هم‌چنین مشخصات مقطع عرضی تمام دیوارها در جدول (۲) نشان داده شده‌اند. دیوارها در هر دو طبقهٔ تیپ درنظر گرفته شده‌اند.

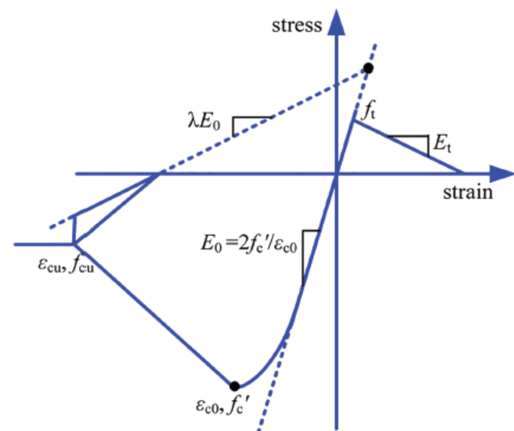
مدل‌سازی غیرخطی

مدل دارای جزئیات

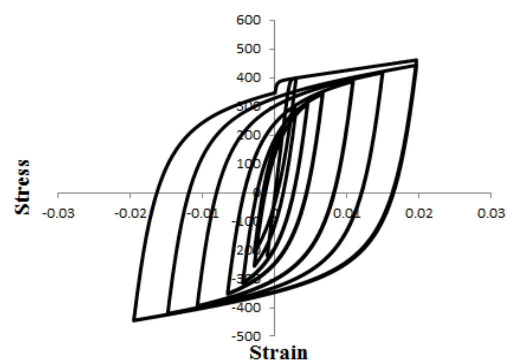
مدل دارای جزئیات به‌عنوان یک مدل مرجع یا مدل اصلی در نرم‌افزار اُپن‌سیس (OpenSees) مدل‌سازی شده‌است. در این مدل برای مدل‌سازی دیوار برشی از دو المان تیر- ستون با مقطع فایبر در هر طبقه استفاده شده‌است به‌طوری‌که مقطع عرضی المان به دسته‌ای از رشته یا فیبرهای محوری که براساس روابط تنش- کرنش محوری مصالح می‌باشند، تقسیم می‌شود. در مدل فایبر دیوار برشی بخش هسته و پوستهٔ المان‌های مرزی با مدل‌های رفتاری محصورشده و غیرمحصورشده از هم تفکیک شده‌اند. تیر و ستون‌های قاب نیز به‌صورت پلاستیسیتهٔ متمرکز مدل‌سازی شده‌اند یعنی یک المان الاستیک به‌همراه دو فنر متمرکز در دو انتهای این المان که غیرخطی شدن عضو را نشان می‌دهند. مدل رفتاری این فنرها مدل رفتاری ایبارا- مدینا- کراوینکلر و مطابق شکل (٦) می‌باشد که در این تحقیق براساس روابط هسلتون برای سازهٔ بتنی مورد استفاده قرار گرفته‌است.



شکل ٦ مدل رفتار غیرخطی فنرهای دورانی



الف



ب

شکل ۷ مدل رفتاری مصالح: الف)Concrete02 و (ب) Steel02 [35]

دقت مدل‌سازی علاوه‌بر نوع روش مدل‌سازی به مدل‌های رفتاری مصالح نیز بستگی دارند. باتوجه به نرم‌افزار اُپن‌سیس مدل‌های هیسترتیک محوری ساختاری مصالح استفاده‌شده در این تحقیق برای بتن و فولاد به‌ترتیب Concrete02 و Steel02 می‌باشند [35].

مدل ساده‌شده

به‌منظور ارائهٔ مدل ساده‌شده برای سیستم دوگانهٔ قاب خمشی و دیوار برشی مطابق شکل (۳)، از سه قاب متصل به‌هم به‌عنوان مدل اصلی یا مدل دارای جزئیات مطابق شکل (۵) استفاده شده‌است؛ لذا در مدل ساده‌شده از یک قاب به‌عنوان جایگزین نُه قاب سیستم اصلی (دو قاب از سیستم ۱، دو قاب از سیستم ۲ و پنج قاب از سیستم ۳) و یک دیوار به‌عنوان جایگزین دو دیوار در سیستم اصلی قاب‌های ۱ و ۲ استفاده شده‌است. تیر واسط بین دیوار و قاب در سیستم ساده‌شده نیز جایگزین چهار تیر واسط در سیستم اصلی قاب‌های ۱ و ۲ می‌باشد.

برای مدل‌سازی دیوار در مدل ساده‌شده از مدل MVLEM استفاده شده‌است، به‌طوری‌که در هر طبقه دو المان MVLEM قرار داده شده‌است و تعداد المان‌های محوری در مقطع عرضی دیوار شش المان می‌باشد یعنی دو المان محوری برای ستون‌های مرزی دیوار و چهار المان محوری که جان دیوار را تشکیل می‌دهند. باتوجه به امکانات برنامهٔ اُپن‌سیس، برای مدل‌سازی این المان‌های محوری از المان‌های تراس استفاده شده‌است که مدل رفتاری و سطح مقطع بتن و فولاد به آن اختصاص داده می‌شود. در مدل ساده‌شده سطح مقطع بتن و میلگردهای دیوار در المان‌های محوری به‌ازای دو دیوار دو برابر شده‌اند.

در تعریف پارامترهای فنرهای انتهایی تیرهای قاب و تیرهای رابط، پارامترهای سختی و لنگر تسلیم در فنر معادل مدل‌های ساده‌شده برابر با مجموع پارامترهای متناظر در مدل اصلی (مجموع موازی فنرها) می‌باشد، یعنی برای تیرهای قاب برابر با مجموع نُه پارامتر از تیرهای قاب‌های ۱ ، ۲ و ۳، و برای تیر واسط برابر با مجموع چهار پارامتر از چهار تیر واسط در قاب‌های اصلی ۱ و ۲ است. سایر پارامترها از جمله پارامترهای زوال مانند M_c/M_y و θ_p به‌صورت میانگین درنظر گرفته شده‌اند. در تعیین پارامترهای فنرهای غیرخطی ستون پارامترهای سختی و لنگر تسلیم در فنر معادل مدل‌های ساده‌شده، برای ستون متصل به دهانهٔ دیوار (ستون چپ) از برآیند مشخصات چهار ستون متصل به دیوار در قاب ۱ و ۲ و سه ستون قاب ۳ استفاده شده‌است. هم‌چنین برای ستون راست در مدل ساده‌شده از برآیند

چهارستون کناری قاب ۱ و ۲ و سه ستون قاب ۳ استفاده شده‌است.

جزء سوم مدل سادهٔ پیشنهادی سیستم دوگانهٔ قاب خمشی- دیوار برشی، تیرهای رابط بین قاب و دیوار هستند که تحت عنوان تیر واسط نام‌گذاری شده‌اند. پارامترهای غیرخطی این تیر رابط معادل چهار تیر واسط بین قاب و دیوار در مدل اصلی مدل‌سازی می‌شود.

ارزیابی مدل سادهٔ پیشنهادی

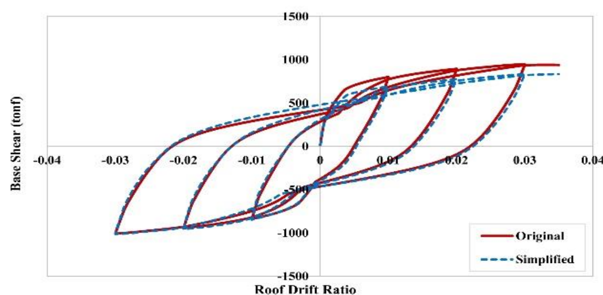
در این تحقیق به‌منظور ارزیابی مدل سادهٔ پیشنهادشده و مقایسهٔ آن با مدل مرجع، پس از مدل‌سازی هر دو مدل در نرم‌افزار اُپن‌سیس، تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی چرخه‌ای و تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی انجام شده‌است.

در جدول (۳) زمان تناوب سه مود اول سازه برای هر دو مدل اصلی و ساده‌شده ارائه شده‌اند. زمان تناوب اصلی سازه در دو مدل اختلاف بسیار کم، ۰/۱۴۲ درصد را نشان می‌دهد که می‌تواند بیانگر این مطلب باشد که مدل ساده‌شدهٔ پیشنهادی سختی اولیهٔ سازه را به‌درستی مدل کرده‌است و تخمین دقیقی از زمان تناوب اصلی سازه ارائه می‌دهد.

جدول ۳ زمان تناب سه مود اول سازه

زمان تناوب مودها	سازهٔ اصلی	سازهٔ ساده‌شده
T_1	۰/۶۳۳۵	۰/۶۳۲۶
T_2	۰/۱۳۱۷	۰/۱۳۰۸
T_3	۰/۰۵۰۶	۰/۰۴۹۷

به‌منظور درک بهتر رفتار غیرخطی کلی سازه در شکل (۸) منحنی پوش‌اُور چرخه‌ای برای سیستم سازهٔ کل آورده شده‌اند که نشـــان می‌دهد رفتار دو مدل در حین باربرداری و بارگذاری مجدد تطبیق مناســـبی دارد و ظرفیت تســـلیم تقریباً یکســـانی را نشان می‌دهد.



شکل ۸ منحنی پوش‌اُور چرخه‌ای

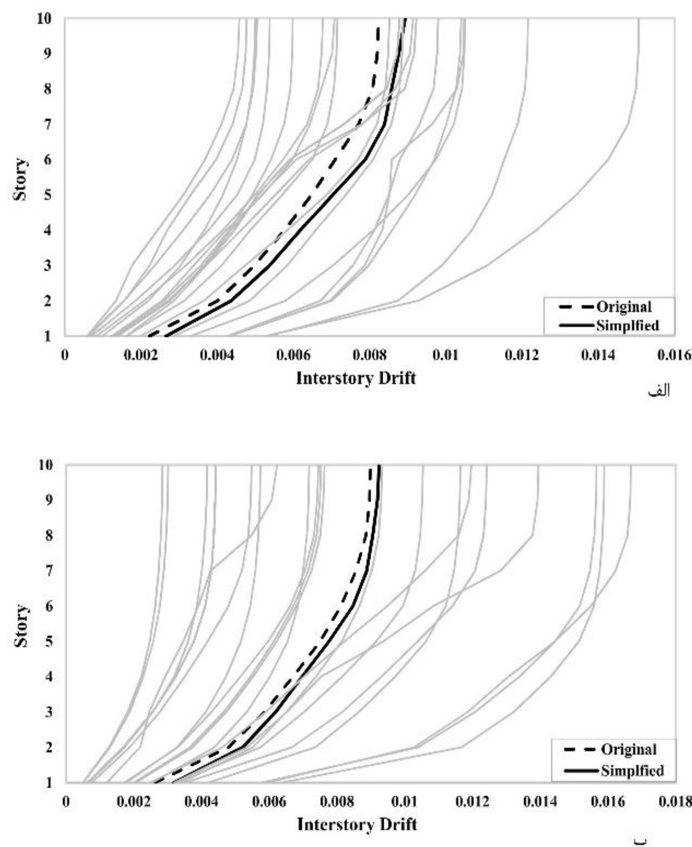
برای ارزیابی دقیق‌تر پاسخ سازه توسط دو مدل اصلی و ساده‌شده از دو دسته رکورد نزدیک گسل و دور از گسل استفاده شده‌است که عبارتند از تعداد ۲۰ رکورد حوزهٔ نزدیک از کار بیکر و تعداد ۲۰ رکورد حوزهٔ دور از FEMA440 و FEMA P-695. مشخصات این رکوردها در جداول (٤) و (٥) آورده شده‌اند. لازم به توضیح است که رکوردهای دور از گسل طوری مقیاس شده‌اند که مقدار طیف شتاب آن‌ها در دورهٔ تناوب اصلی ساختمان برابر با طیف طرح ساختمان شود. از جمله پارامترهای مهمی که در ارزیابی رفتار لرزه‌ای و خسارت سازه در مهندسی زلزله مورد توجه است جابه‌جایی نسبی طبقات می‌باشد. در این تحقیق نیز از این پارامتر به‌منظور بررسی پاسخ‌های سازه با دو مدل اصلی و ساده‌شده استفاده شده‌است و برای بررسی دقیق‌تر پاسخ‌ها، کمیت‌های بایاس و پراکندگی دو پارامتر به‌ازای رکوردهای حوزهٔ دور و نزدیک تعیین شده‌اند. شکل (۹) توزیع جابه‌جایی‌های نسبی را در ارتفاع طبقات ساختمان نشان می‌دهند. هر منحنی خاکستری‌رنگ توزیع جابه‌جایی نسبی را در مدل اصلی به‌ازای هر رکورد زلزله نشان می‌دهد. علاوه‌بر این جابه‌جایی نسبی متوسط حاصل از تمام رکوردها برای دو مدل اصلی و ساده‌شده نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود جابه‌جایی نسبی در طبقات بالاتر بیشتر از طبقات پایین‌تر می‌باشد، به عبارت دیگر جابه‌جایی نسبی طبقات تحت تأثیر عملکرد دیوار قرار گرفته‌است. هم‌چنین باتوجه به جابه‌جایی نسبی متوسط، پاسخ حاصل از دو مدل اصلی و ساده‌شده تحت زلزلهٔ نزدیک گسل اختلاف کمتری را نشان می‌دهند.

جدول ٤ رکوردهای انتخابی نزدیک گسل

نام زلزله	بزرگا (Mw)	فاصله از گسل (Km)	PGA (g)	ایستگاه
Imperial Valley-06	6.53	7.3	0.179	EC County Center FF
Imperial Valley-06	6.53	0.1	0.378	EC Meloland Overpass FF
Imperial Valley-06	6.53	7.1	0.357	El Centro Array #4
Imperial Valley-06	6.53	4.0	0.375	El Centro Array #5
Imperial Valley-06	6.53	0.6	0.462	El Centro Array #7
Imperial Valley-06	6.53	3.9	0.468	El Centro Array #8
Imperial Valley-06	6.53	5.1	0.417	El Centro Differential Array
Westmorland	5.9	16.7	0.172	Parachute Test Site
Coalinga-05	5.8		0.866	Oil City
Morgan Hill	6.2	0.5	0.814	Coyote Lake Dam (SW Abut)
Taiwan SMART1(40)	6.3		0.205	SMART1 C00
Loma Prieta	6.93	8.5	0.363	Saratoga
Erzican	6.69	4.4	0.486	Erzican
Cape Mendocino	7.01	8.2	0.615	Petrolia
Northridge-01	5.4	6.7	0.518	Jensen Filter Plant
Northridge-01	5.4	6.7	0.518	Jensen Filter Plant Generator
Northridge-01	5.5	6.7	0.426	Newhall - W Pico Canyon Rd.
Northridge-01	7.0	6.7	1.376	Pacoima Dam (upper left)
Northridge-01	5.4	6.7	0.594	Sylmar - Converter Sta
Kobe, Japan	0.3	6.9	0.645	Takarazuka

جدول ٥ رکوردهای انتخابی دور از گسل

نام زلزله	بزرگا (Mw)	فاصله از گسل (Km)	PGA (g)	ایستگاه
Imperial Valley-06	7.28	23.6	0.245	Yermo
Imperial Valley-06	7.28	36.2	0.089	Palm Springs, Airport
Imperial Valley-06	6.69	17.3	0.883	Santa Monica City Hall
Imperial Valley-06	6.69	10.4	0.367	Los Angeles, Hollywood Storage Bldg
Imperial Valley-06	6.69	24.3	0.172	Los Angeles, N. Westmoreland
Imperial Valley-06	7.01	22.7	0.55	Rio Dell Overpass
Imperial Valley-06	7.62	32	0.44	CHY101
Westmorland	7.62	77.5	0.51	TCU045
Coalinga-05	7.14	41.3	0.82	Bolu
Morgan Hill	7.13	26.5	0.34	Hector
Taiwan SMART1(40)	6.53	33.7	0.35	Delta
Loma Prieta	6.9	8.7	0.51	Nishi-Akashi
Erzican	6.6	46	0.24	Shin-Osaka
Cape Mendocino	7.51	53.7	0.22	Arcelik
Northridge-01	7.51	98.2	0.36	Duzce
Northridge-01	7.28	82.1	0.42	Coolwater
Northridge-01	6.93	9.8	0.53	Capitola
Northridge-01	7.37	40.4	0.51	Abbar
Northridge-01	6.69	13.3	0.52	BeverlyHillsMulhol
Kobe, Japan	6.54	11.2	0.45	PoeRoad



شکل ۹ توزیع جابه‌جایی نسبی طبقات تحت: (الف) رکوردهای حوزهٔ دور و (ب) رکوردهای حوزهٔ نزدیک

به‌منظور ارزیابی دقت مدل‌ها از پارامترهای بایاس و پراکندگی استفاده شده‌است. مدل فایبر به‌عنوان مدل مرجع درنظر گرفته شده‌است. این دو پارامتر به‌صورت روابط زیر تعریف می‌شوند:

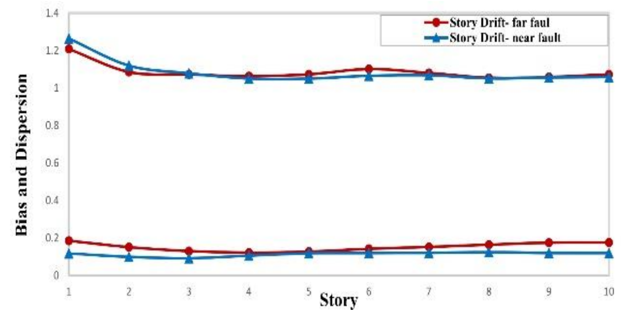
$$\delta = e^{\frac{1}{n}\Sigma \ln(\frac{\theta'}{\theta})} \quad (۱)$$

$$\sigma = SD(\ln\left(\frac{\theta'}{\theta}\right)) \quad (۲)$$

در این روابط n تعداد رکوردهای زلزله، θ حداکثر جابه‌جایی نسبی در هر طبقه در مدل دارای جزئیات و θ' حداکثر جابه‌جایی نسبی در مدل‌های سادهٔ پیشنهادی می‌باشد.

فاکتور بایاس (δ) یک پیش‌بینی‌کنندهٔ عبارت است از میانگین هندسی θ'/θ که اگر این فاکتور کمتر از یک باشد پیش‌بینی‌کنندهٔ θ' به‌طور متوسط تخمینی دست پایین از θ ارائه می‌دهد. و اگر بزرگ‌تر از یک باشد θ' به‌طور متوسط θ را دست بالا تخمین می‌زند. هم‌چنین دقت یک پیش‌بینی‌کنندهٔ توسط فاکتور پراکندگی (σ) محاسبه می‌شود که عبارت است از انحراف استاندارد لگاریتم طبیعی θ'/θ که هر چه مقدار پراکندگی کمتر باشد، پراکندگی پیش‌بینی‌کنندهٔ θ' در اطراف $\delta\theta$ کمتر است و درنتیجه دقت پیش‌بینی‌کنندهٔ θ' بیشتر است.

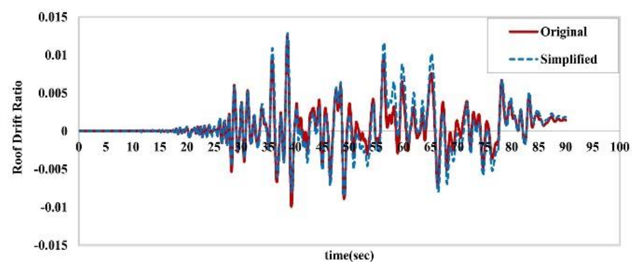
مقادیر بایاس و پراکندگی تحت رکوردهای حوزهٔ دور و نزدیک در شکل (۱۰) نشان داده شده‌اند. مطابق شکل، مقادیر بایاس در دو طبقهٔ اول بیشتر است و مدل ساده‌شده پاسخ جابه‌جایی نسبی را در این طبقات حدود ۲۰ درصد بیشتر نشان می‌دهد؛ اما در طبقات بالاتر، مقدار بایاس کمتر شده و پاسخ پیش‌بینی‌شده توسط مدل ساده‌شده به‌طور متوسط نزدیک به مدل دارای جزئیات بوده‌است. به‌طور کلی نیز به‌ازای رکوردهای حوزهٔ نزدیک، مدل ساده‌شده پیش‌بینی دقیق‌تری از پاسخ جابه‌جایی نسبی طبقات ارائه نموده‌است. هم‌چنین مقادیر پراکندگی در طبقات مختلف نشان می‌دهند که مدل ساده‌شده در پیش‌بینی جابه‌جایی نسبی طبقات مختلف تحت زلزله‌های حوزهٔ نزدیک و دور حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد خطا دارد.

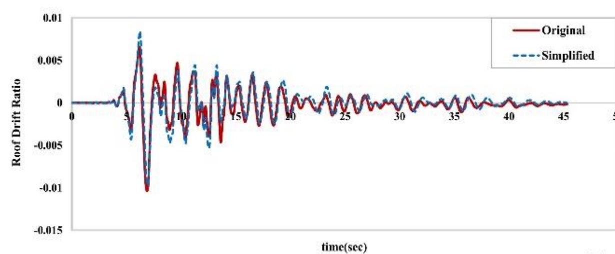


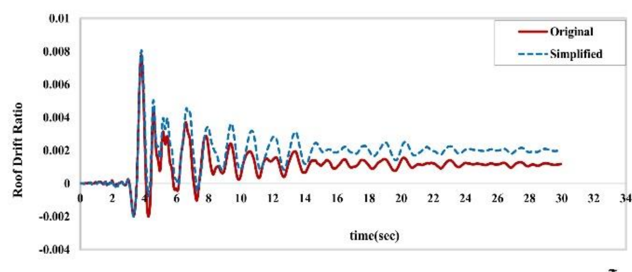
شکل ۱۰ بایاس و پراکندگی جابه‌جایی نسبی طبقات تحت رکوردهای حوزهٔ دور و نزدیک

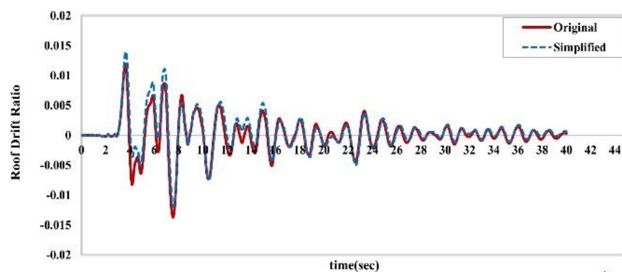
در شکل‌های (۱۱) نمونه‌هایی از منحنی‌های تاریخچه‌زمانی نسبت جابه‌جایی بام برای مدل‌های اصلی و ساده‌شده، تحت دو رکورد حوزهٔ دور و دو رکورد حوزهٔ نزدیک نشان داده شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود روند نوسانات پاسخ در طول زمان برای هر دو گروه رکورد حوزهٔ دور و نزدیک در دو مدل اصلی و ساده‌شده مشابه می‌باشد ولی در جابه‌جایی‌های حداکثر و جابه‌جایی‌های ماندگار برای بعضی از رکوردهای زلزله تفاوت‌هایی مشاهده می‌شود.

باتوجه به این‌که یکی از مهم‌ترین اهداف ایجاد مدل‌های ساده‌شدهٔ چند درجه آزادی کاهش زمان انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی می‌باشد، مدت زمان انجام تحلیل برای هر دو مدل اصلی و ساده به‌ازای هر یک از رکوردهای حوزهٔ دور و نزدیک تعیین شده و در شکل (۱۲) نشان داده شده‌اند.

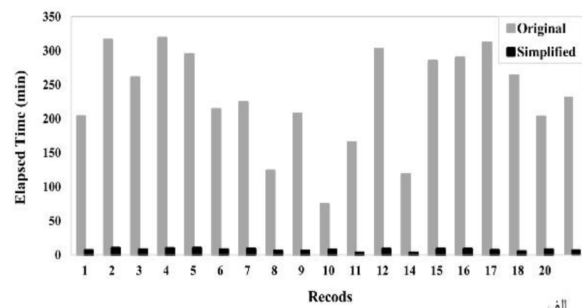


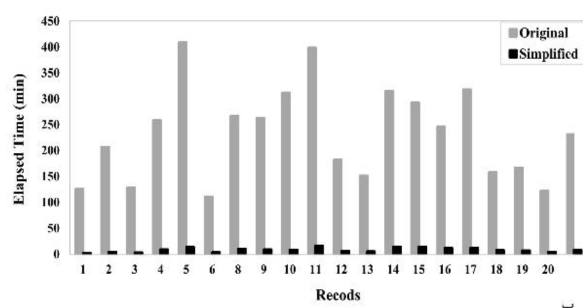






شکل ۱۱ نمودار تاریخچه‌زمانی جابه‌جایی بام تحت رکورد (الف) حوزهٔ دور FEMA695ChiChiCHY101، (ب) حوزهٔ دور HectorMineHector، (ج) حوزهٔ نزدیک Morgan Hill و (د) حوزهٔ نزدیک Northridge-01





شکل ۱۲ مقایسهٔ مدت زمان مورد نیاز برای تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت رکوردهای: (الف) حوزهٔ دور و (ب) حوزهٔ نزدیک

مطابق شکل (۱۲) مجموع زمان انجام تحلیل تاریخچه‌زمانی مربوط به دو مدل اصلی و ساده‌شده تحت تمام ۴۰ رکورد حوزهٔ دور و نزدیک به‌ترتیب ۱۴۳ و ۵ ساعت بوده‌است. ملاحظه می‌شود که مدل ساده‌شده حدود ۳۰ برابر زمان انجام تحلیل را کاهش می‌دهد که این مورد مهم‌ترین قابلیت و کارایی مدل ساده‌شده در تعیین پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک مدل ساده‌شده برای سیستم دوگانهٔ قاب خمشی- دیوار برشی منظم با دهانهٔ برابر ارائه شده‌است که در آن برای مدل‌سازی دیوار برشی از مدل MVLEM و برای مدل‌سازی قاب خمشی بتنی از مدل قاب جایگزین استفاده شده‌است. برای ارزیابی دقت مدل ساده‌شدهٔ پیشنهادی، مدل دارای جزئیات یک ساختمان دارای سیستم مشتمل بر قاب چنددهانه و دیوار برشی با مدل فایبر در نرم‌افزار OpenSees مدل‌سازی شد.

نتایج آنالیزهای غیرخطی برای ۲۰ رکورد نزدیک گسل و ۲۰ رکورد دور از گسل نشان می‌دهد که مدل ساده‌شدهٔ پیشنهادی جابه‌جایی نسبی طبقات را با خطای کمتر از ۲۰ درصد پیش‌بینی می‌کند. درحالی‌که مدت زمان لازم برای تحلیل مدل ساده‌شده حدود ۳۰ برابر کمتر از زمان لازم برای تحلیل مدل دارای جزئیات است.

برای ارزیابی پاسخ دینامیکی مدل ساده‌شده از تغییرمکان نسبی طبقات و دو شاخص آماری بایاس و پراکندگی استفاده شد که همواره این شاخص‌های آماری انحراف و پراکندگی کمتر از ۲۰ درصد را نشان داده‌اند.

مراجع

1. Taucer, F., Spacone, E., & Filippou, F. C., "A Fiber Beam-Column Element for Seismic Response Analysis of Reinforced Concrete Structures", *Earthquake Engineering Research Center,* Report No. UCB/EERC-91/17, College of Engineering, University of California, (1991).
2. Petrangeli, M., Pinto, P. E., & Ciampi, V., "Fiber Element for Cyclic Bending and Shear of RC Structures. I: Theory", *Journal of Engineering Mechanics,* Vol. 125, No. 9, pp. 994-1001, (1999).
3. Petrangeli, M., "Fiber Element for Cyclic Bending and Shear of RC Structures. II: Verification", *Journal of engineering mechanics,* Vol. 125, No. 9, pp. 1002-1009, (1999).
4. Kabeyasawa, T., Shiohara, H., Otani, S., & Aoyama, H., "Analysis of the Full-Scale Seven-Story Reinforced Concrete Test Structure", *Journal of the Faculty of Engineering,* Vol. 37, No. 2, pp. 431-478, (1983).
5. Vulcano, A., & Bertero, V. V., "Analytical Models for Predicting the Lateral Response of RC Shear Walls: Evaluation of Their Reliability", *Earthquake Engineering Research Center,* Report No. UCB/EERC-87/19, College of Engineering, University of California, (1987).
6. Vulcano, A., Bertero, V. V., & Colotti, V., "Analytical Modeling of RC Structural Walls", *In Proceedings of 9th world conference on earthquake engineering,* Vol. 6, pp. 41-46, (1988).
7. Massone, L. M., & Wallace, J. W., "Load-Deformation Responses of Slender Reinforced Concrete Walls", *Structural Journal,* Vol. 101, No. 1, pp. 103-113, (2004).
8. Orakcal, K., & Wallace, J. W., "Nonlinear Modeling and Analysis of Slender Reinforced Concrete Walls", *ACI Structural Journal,* Vol. 101, No. 5, pp. 688-698, (2004).
9. Kolozvari, K., Orakcal, K., & Wallace, J. W., "Modeling of Cyclic Shear-Flexure Interaction in Reinforced Concrete Structural Walls. I: Theory", *Journal of Structural Engineering,* Vol. 141, No. 5, pp. 04014135, (2015).

10. Kolozvari, K., Tran, T. A., Orakcal, K., & Wallace, J. W., "Modeling of Cyclic Shear-Flexure Interaction in Reinforced Concrete Structural Walls. II: Experimental Validation", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 141, No. 5, pp. 04014136, (2015).
11. Kolozvari, K., Orakcal, K., & Wallace, J. W., "Shear-Flexure Interaction Modeling of reinforced Concrete Structural Walls and Columns under Reversed Cyclic Loading", Pacific Earthquake Engineering Research Center, Report No. PEER-2015/12, University of California, Berkeley, (2015).
12. Kolozvari, K., & Wallace, J. W., "Practical Nonlinear Modeling of Reinforced Concrete Structural Walls", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 142, No. 12, pp. G4016001, (2016).
13. Esmaeiltabar, P., Vaseghi, J., & Khosravi, H., "Nonlinear Macro Modeling of Slender Reinforced Concrete Shear Walls", *Structural Concrete*, Vol. 20, No. 3, pp. 899-910, (2019).
۱۴. اسماعیل تبار نشلی، پ.، واثقی امیری، ج.، خسروی، ح.، «مقایسهٔ مدل سادهشدهٔ چند المان محوری با مدل فایبر در مدل‌سازی غیرخطی دیوار برشی بتنی»، نشریهٔ مهندسی سازه و ساخت، دورهٔ ۷، شمارهٔ ۳۱، (بهار ۱۳۹۹).
15. Nakashima, M., Ogawa, K., & Inoue, K., "Generic Frame Model for Simulation of Earthquake Responses of Steel Moment Frames", *Earthquake engineering & structural dynamics*, Vol. 31, No 3, pp. 671-692, (2002).
16. Khaloo, A. R., & Khosravi, H., "Modified Fish-Bone Model: A Simplified MDOF Model for Simulation of Seismic Responses of Moment Resisting Frames", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 55, pp. 195-210, (2013).
17. Soleimani, R., Khosravi, H., & Hamidi, H., "Substitute Frame and Adapted Fish-Bone model: Two Simplified Frames Representative of RC Moment Resisting Frames", *Engineering Structures*, Vol. 185, pp. 68-89, (2019).
18. d'Aragona, M. G., Polese, M., & Prota, A., "Stick-IT: A Simplified Model for Rapid Estimation of IDR and PFA for Existing Low-Rise Symmetric Infilled RC Building Typologies", *Engineering Structures*, Vol. 223, pp. 111182, (2020).
19. Gaetani d'Aragona, M., Polese, M., Di Ludovico, M., & Prota, A., "The Use of Stick- IT Model for the Prediction of Direct Economic Losses", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 50, No. 7, pp. 1884-1907, (2021).
20. Soleimani, R., & Hamidi, H., "General Substitute Frame Model (GSF) for Efficient Estimation of Seismic Demands of Steel and RC Moment Frames", *Engineering Structures*, Vol. 246, pp. 113031, (2021).
21. Soleimani, R., & Hamidi, H., "Improved Substitute-Frame (ISF) Model for Seismic Response of Steel-MRF with Vertical Irregularities", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 186, pp. 106918, (2021).
22. Jamšek, A., & Dolšek, M., "The Reduced-Degree-of-Freedom Model for Seismic Analysis of Predominantly Plan-Symmetric Reinforced Concrete Wall-Frame Building", *Buildings*, Vol. 11, No. 8, pp. 372, (2021).
23. Jamšek, A., & Dolšek, M., "Seismic Analysis of Older and Contemporary Reinforced Concrete Frames with the Improved Fish-Bone Model", *Engineering Structures*, Vol. 212, pp. 110514, (2020).
24. Hosseini, M., Amiri, H. A., & Estekanchi, H. E., "Consistent One-Bay Frame Simplified Model for Efficient Seismic Evaluation of Steel Moment Frame Buildings with Equal and Unequal Bay Lengths", *In Structures*, Vol. 34, pp. 3345-3362, Elsevier, (2021).
25. Qu, Z., Gong, T., Wang, X., Li, Q., & Wang, T., "Stiffness and Strength Demands for Pin-Supported Walls in Reinforced-Concrete Moment Frames", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 146, No. 9, pp. 04020181, (2020).

26. Ghaderi, P., Khosravi, H., & Firoozjaee, A. R., "Consideration of Strength-Stiffness Dependency in the Determination of Lateral Load Pattern", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* Vol. 137, pp. 106287, (2020).
27. Wu, P., "Population Development Challenges in China ", Springer, Singapore, pp. 205-216, (2020).
28. Khan, F. R., & Sbarounis, J. A., "Interaction of Shear Walls and Frames", *Journal of the Structural Division,* Vol. 90, No. 3, pp. 285-335, (1964).
29. Kuang, J. S., & Huang, K., "Simplified Multi- Degree- of- Freedom Model for Estimation of Seismic Response of Regular Wall- Frame Structures", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 20, No. 3, pp. 418-432, (2011).
30. Azzato, F., & Vulcano, A., "Modeling of RC Frame-Wall Structures for Nonlinear Seismic Analysis", *In Proceedings of the 11 th World Conference on Earthquake Engineering,* Acapulco, Mexico, (1996).
31. Zhou, X., & Li, G., "A Macro-Element Based Practical Model for Seismic Analysis of Steel-Concrete Composite High-Rise Buildings", *Engineering structures,* Vol. 49, pp. 91-103, (2013).
32. Kolozvari, K., & Wallace, J. W., "Practical Nonlinear Modeling of Reinforced Concrete Structural Walls", *Journal of Structural Engineering,* Vol. 142, No. 12, pp. G4016001., (2016).
33. Li, G., Zhang, F., Zhang, Y., & Li, H. N., "Nonlinear Hysteretic Behavior Simulation of Reinforced Concrete Shear Walls Using the Force Analogy Method", *The Structural Design of Tall and Special Buildings,* Vol. 24, No. 7, pp. 504-520, (2015).
34. Kazaz, İ., & Gülkan, P., "Dynamic Shear Force Amplification in Regular Frame-Wall Systems", *The Structural Design of Tall and Special Buildings,* Vol. 25, No. 2, pp. 112-135, (2016).
35. McKenna, F., Fenves G. L., Scott, M. H., & Jeremic, B., "Open system for earthquake engineering simulation (OpenSees)." Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA (2000).